

УДК 620.179.1

¹С.Р. Ігнатович, д-р техн. наук
²М.В. Карускевич, канд. техн. наук
³О.М. Карускевич
⁴С.В. Хижняк, канд. техн. наук
⁵С.А. Якушенко, канд. техн. наук

МОНІТОРИНГ УТОМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: ¹ignatovich@nau.edu.ua; ^{2,3,4}vbif@i.com.ua; ⁵yyuys@mail.ru

Подано результати експериментів, спрямованих на створення нового інструментального методу діагностики пошкодження від утомленості й оцінки залишкового ресурсу авіаційних конструкцій. Показано, що деформаційний рельєф, який формується на поверхні плакувального шару листів конструкційних сплавів Д-16АТ, 2024-Т3, 7075-Т6, можна розглядати як індикатор пошкодження металу циклічним навантаженням.

Вступ

Статистика руйнувань багатьох конструкцій, зокрема авіаційних, показує, що дотепер немає достатньо надійних розрахункових методів оцінювання пошкодження від утомленості і визначення залишкового ресурсу.

Кількість методів інструментального визначення пошкодження від утомленості досить велика. Значну їх частину оснований на застосуванні зразків-свідків, що прикріплюються до досліджуваного об'єкта. Такі пристрої називають датчиками втоми, сенсорами, індикаторами деформаційного пошкодження та ін. Огляд виконаних раніше розробок наведено у працях [1] – [3].

Сприймаючи експлуатаційний спектр циклічних деформацій, індикатори, руйнуючись чи змінюючи свій стан, сигналізують про процеси, які виникають в матеріалі досліджуваного елемента конструкції. Одним із найбільш навантажених елементів конструкції літака є його обшивка [4].

Для виготовлення обшивки літаків цивільної авіації в Україні і Росії широко використовуються алюмінієві сплави Д-16 і В-95, за кордоном застосовують їх аналоги – сплави 2024-Т3 і 7075-Т6. Основні компоненти сплавів Д-16 і 2024-Т3 – алюміній, мідь, магній, а сплавів В-95 і 7075-Т6 – алюміній і цинк. Для зменшення ймовірності виникнення і розвитку корозії листи зазначених сплавів плакуються шаром алюмінію. Товщина плакувального шару становить 5–7%.

Алюміній і ті його сплави, що використовують для плакування, належать до матеріалів, на поверхні яких під дією механічних навантажень формуються смуги ковзання, тобто деформаційний рельєф. У зв'язку з цим поверхневий шар, стан якого змінюється під впливом навантажень, на думку авторів, може виконувати функцію індикатора деформаційного пошкодження конструкцій, виготовлених із плакованих алюмінієм листів конструкційних сплавів.

Постановка завдання

Робота спрямована на обґрунтування можливості діагностики пошкодження авіаційних конструкцій від утомленості.

Методика експерименту

Інформацію про нагромадження пошкодження від утомленості і оцінку залишкового ресурсу можна одержати, аналізуючи стан поверхні в критичних точках конструкції.

Дослідження деформаційного рельєфу, що виникає і розвивається на поверхні плакувального шару конструкційних алюмінієвих сплавів Д-16, 2024-Т3, 7075-Т6, виконували на стандартних зразках товщиною 1,5 мм для випробувань на втому з отвором діаметром 4 мм у центральній частині для локалізації руйнування і моделювання особливостей роботи реальних конструкцій. Наявність концентратора визначало також і зону контролю.

Листи товщиною 1,5 мм застосовують для виготовлення обшивки фюзеляжу багатьох літаків. Отвір діаметром 4 мм моделює отвір під заклепку для з'єднання листів обшивки між собою і з елементами каркаса: стрингерами і шпангоутами. Такий концентратор напружень є масовим. Кількість заклепок у конструкції сучасного пасажирського літака, розрахованого на перевезення 200 пасажирів, перевищує 1,5 млн.

Для виконання випробувань використовувалася стандартна гідропульсаційна машина МУП-20. Навантаження проводилися віднульовим синусоїдним циклом.

Максимальні напруження циклу становили: 125 МПа для зразка – №1; 116 МПа для зразка – № 2; 88 МПа для зразка – № 3, частота навантаження 11 Гц.

Надалі, передбачається проведення випробувань у широкому діапазоні експлуатаційних режимів навантаження з реалізацією як регулярних, так і нерегулярних (програмних) режимів.

Для моніторингу деформаційного рельєфу було розроблено і виготовлено спеціальне обладнання для використання уніфікованих елементів, які виготовляються серійно, мають стабільні характеристики і відносно невисоку ціну. Виготовлено моніторингові системи декількох рівнів, як функціональних, так і цінових. Для первинного оперативного контролю стану поверхні розроблено систему, яка складається з переносного оптичного мікроскопа (збільшення $\times 24$), WEB-камери відносно невеликого розділення і портативного комп'ютера.

Для контролю стану поверхні і виконання кількісної оцінки стану нагромадженого пошкодження безпосередньо в процесі циклічного навантаження розроблено систему, яка монтується на випробувальній машині і складається із оптичного мікроскопа (збільшення $\times 200$), WEB-камери або цифрової фотокамери і портативного чи звичайного персонального комп'ютера.

Для виконання кількісної оцінки нагромадженого пошкодження і детального дослідження поверхневих структур розроблено систему, яка складається із стаціонарного металографічного мікроскопа ММР-4 (збільшення до 600), цифрової фотокамери і портативного чи звичайного персонального комп'ютера.

Результати експерименту

Формування деформаційного рельєфу за зазначених умов спостерігалось після перших декількох тисяч циклів навантаження.

Тривимірність досліджувальних структур і відповідність їх відомій схемі формування екструзій та інтрузій [6] підтверджено результатами електронно-мікроскопічного дослідження з використанням растрового електронного мікроскопа DSM950 (Zeiss – Germany).

Як приклад наведено знімки, одержані під час дослідження зразка сплаву Д-16АТ (рис. 1).

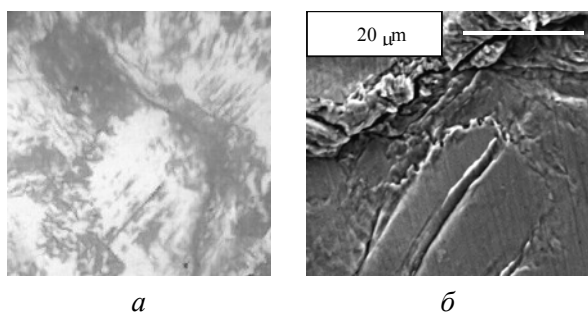


Рис. 1. Поверхня зразка сплаву Д-16АТ після циклічного навантаження і формування деформаційного рельєфу і тріщини від утомленості:

a – знімок, одержаний за допомогою оптичного мікроскопа ($\times 400$); *б* – знімок, одержаний за допомогою растрового електронного мікроскопа

Дослідження деформаційного рельєфу і кількісна оцінка нагромадженого пошкодження виконувалися за допомогою системи, яка складалась із оптичного мікроскопа ММР-4 (збільшення 400), цифрової камери «Olympus C-220» (1600 \times 1200 pt) і портативного комп'ютера.

В основі методу кількісної оцінки, що пропонується, лежать експериментальні дані, які вказують на тісний кореляційний зв'язок нагромадженого пошкодження від утомленості зі щільністю слідів деформації (смуг ковзання) на поверхні, одержані авторами при дослідженні деформаційного рельєфу монокристалів алюмінію в процесі втоми [1–3] і праці інших дослідників [5; 6].

Фотографії поверхні циклічно деформованих зразків оброблювали за допомогою обчислювальної програми, що дозволяє визначити параметр пошкодження D , який являє собою числове значення відносної площі поверхні зі слідами деформації.

Для розпізнавання пошкоджених ділянок поверхні використано спеціально розроблену комп'ютерну програму. Програма працює з файлами, які зберігають зображення поверхні у використаному форматі рисунка, що належить до растрового типу. При цьому усе зображення розбивається на окремі точки (пікселі) і у файлі зберігається інформація щодо кольору кожної точки. Колір кожної точки зображення складається з трьох складових – червоної, зеленої та голубої. Кожна складова може мати 256 градацій (0–255). Для білого кольору значення всіх складових – 255, для чорного – 0. Якщо використовують палітру зображення "відтінок сірого", значення складових змінюються однаково від 0 до 255 і не має значення, канал якої складової застосовувати. Для кольорового зображення необхідно обрати одну зі складових або їх середнє значення.

Підрахунок процента поверхні, зайнятої пошкодженнями для чорно-білого зображення (величина складових кольору набуває значення 0 чи 255), складається з підрахунку точок, для яких обрано складову. Для кольорових рисунків і рисунків у форматі "відтінки сірого" вводиться значення складової, нижче якої колір точки вважається чорним.

Система дозволяє виконувати розпізнавання за загальним для всього рисунка або за локальним значенням градації. Останній режим передбачається для рисунків із зонами нерівномірного освітлення. Крім розпізнавання зображення в чорно-білий колір, система може для більш глибокого та всебічного аналізу підвищувати контрастність зображення.

Наведена обробка є первісною. Крім неї, розроблене програмне забезпечення дозволяє виконувати вторинну обробку, в ході якої система вирішує такі завдання:

- кластеризацію розміщених поблизу чорних чи білих пікселів (точок) в об'єкти, що досліджуються;
- фільтрацію розпізнаних об'єктів з метою вилучення об'єктів, обраний розмір яких менше заданого;
- побудову відфільтрованого зображення;
- розрахунок геометричних характеристик розпізнаних об'єктів;
- статистичну обробку обраної характеристики об'єктів.

Для оптимізації процесу моніторингу деформаційної пошкодженості виконано дослідження розподілення пошкодження поблизу концентратора напружень (отвору). Пошкодження оцінено після 140 тисяч циклів навантаження і формування мікротріщини за максимального напруження циклу 150 МПа. Із рис. 2 видно, що оптимальною зоною контролю є ділянка поверхні близько концентратора напружень.

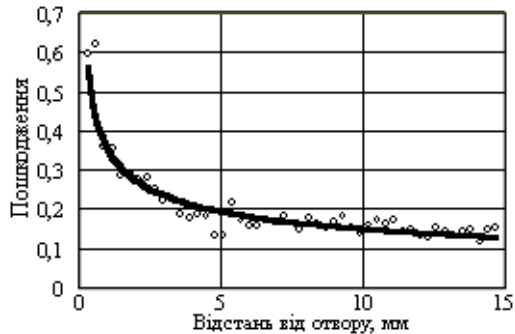


Рис. 2. Результати визначення пошкодженості поблизу отвору після 140 тисяч циклів і формування мікротріщини

Параметр пошкодження D має максимальне числове значення. Викликає інтерес порівняння одержаного розподілення пошкодження з розподіленням напружень для даного матеріалу і розміру отвору. (рис. 3).

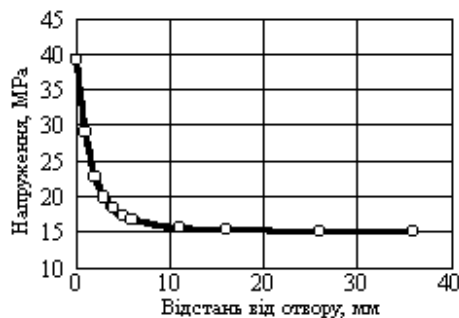


Рис. 3. Розподілення напружень поблизу отвору

Одержана відповідність підтверджує наявність очікуваного зв'язку пошкодження і напруженого стану.

На ділянці, на якій напруження не перевищували $\sigma_{0,2}$ (для алюмінієвого сплаву Д-16 $\sigma_{0,2}$

дорівнює 290 МПа), розподілення напружень σ_{θ} визначали за формулою [7]:

$$\sigma_{\theta} = \sigma \left(1 + \frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} + \frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} \right), \quad (1)$$

де σ – номінальне напруження в перерізі зразка; a – відстань від центра кола до точки визначення σ_{θ} ; r – радіус отвору.

На ділянці поблизу отвору, де напруження перевищували 290 МПа, коефіцієнт концентрації напружень у пружно-пластичній зоні визначали за виразом [8]:

$$K_{\delta} = \left(\frac{\alpha_m^2}{\bar{E}} \right)^{m+1} \frac{m}{\sigma^{m+1}}, \quad (2)$$

де m – коефіцієнт деформаційного зміцнення; \bar{E} – відносне значення модуля пружності:

$$\bar{E} = \frac{E}{E_m},$$

E – модуль пружності матеріалу; E_m – перетинний модуль пружності:

$$E_m = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} = \frac{\sigma_m}{0,002 + \sigma_m / E}.$$

Маючи значення інтенсивності номінальних напружень і механічні характеристики матеріалу E , σ_m , m , за формулою (2) можна розрахувати значення коефіцієнта K_{σ} і, отже, визначити максимальну інтенсивність напружень у зоні концентрації при пружно-пластичному деформуванні.

Результати моніторингу пошкодження показали, що незалежно від рівня циклічних напружень у діапазоні, що досліджується, максимальне значення параметра пошкодження D , яке відповідає моменту з'явлення тріщини від утомленості, становить 0,43–0,47.

Отже, можна припустити, що в певному діапазоні режимів навантаження розглядуваний метод дозволяє прогнозувати критичний стан. Це припущення підтверджується показаними на рис. 4 залежностями пошкодження D від безрозмірного параметра, який характеризує виробіток ресурсу досліджуваного елемента:

$$N_{\text{від}} = N_{\text{пот}} / N_p,$$

де $N_{\text{від}}$ – відносне напрацювання; $N_{\text{пот}}$ – поточна кількість циклів навантаження; N_p – кількість циклів навантаження, яке відповідає досягненню критичного стану зразку.

У цьому разі критичним станом вважається досягнення тріщиною від утомленості довжини 1,0 мм.

Залежності $D = f(N_{\text{від}})$ побудовано для зразків, які випробовувалися при максимальних напруженнях циклу 125, 116, 88 МПа.

Показані на рис. 4 залежності дозволяють виконувати оцінку виробітку ресурсу в разі циклічного навантаження при режимах, що знаходяться в означеному діапазоні напружень, незалежно від їх рівня.

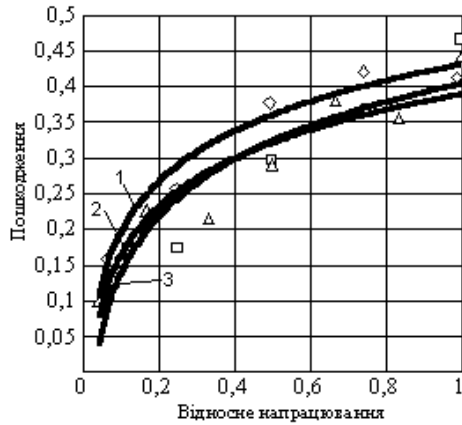


Рис. 4. Залежності параметра пошкодження від відносного напруження:

- 1 – максимальне напруження циклу 125 МПа;
2 – максимальне напруження циклу – 88 МПа;
3 – максимальне напруження циклу – 116 МПа

Точність оцінки найвища на початкових стадіях пошкодження від утомленості. Наприклад, якщо значення параметра $D = 0,2$, похибка визначення виробітку ресурсу не перевищує 10 %.

Висновки

Проведені експерименти підтвердили можливість діагностики і моніторингу втомного пошкодження від утомленості елементів конструкцій, виготовлених із плакованих листів алюмінієвих конструкційних сплавів.

Для виконання процедури діагностики і моніторингу можна використовувати розглянуте обладнання і програмне забезпечення.

С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич, С.В. Хижняк, С.А. Якушенко
Мониторинг усталости конструкционных алюминиевых сплавов

Приведены результаты экспериментов, направленных на создание нового инструментального метода диагностики усталостного повреждения и оценки остаточного ресурса авиационных конструкций. Показано, что деформационный рельеф, формирующийся на поверхности лакирующего слоя листов конструкционных сплавов Д-16АТ, 2024-Т3, 7075-Т6, может рассматриваться как индикатор повреждения металла циклическими нагрузками.

S.R. Ignatovich, M.V. Karuskevich, O.M. Karuskevich, S.V. Hizhnjak, S.A. Yakushenko
Fatigue damage monitoring of structural aluminum alloys

Results of the experiments directed on creation of a new tool method of fatigue damage diagnostics and an estimation of a residual life of aviation designs are presented. It is shown, that the deformation relief formed on a surface of cladding layer of sheets of constructional alloys Д-16АТ, 2024-Т3, 7075-Т6 can be considered as the metal damage indicator under cyclically repeating loadings.

Подальший розвиток запропонованого методу з метою його практичного застосування потребують проведення широкого спектра випробувань на втому, включаючи програмні випробування реальних елементів авіаційних конструкцій.

Список літератури

1. Karuskevich M.V., Gordienko Yu., Zasimchuk E.E. Forecasting the critical state of deformed crystal by analysis of smart defect structure // Fractal characteristics and percolation critical indexes: Proc. of the 17 th conf. on sensors and their applications, held in Dublin, Ireland. – Dublin. – 1995, 10–13 Sept. – 112–117.
2. Засимчук Е.Э., Радченко А.И., Карускевич М.В. Single-crystals as an Fatigue indicator of fatigue damage // Fatigue Fract. Engng. Mater.Struct. – 1992. – Vol. 15, № 12. – P. 1281–1283.
3. Карускевич М.В., Радченко А.И., Засимчук Е.Э., Метод и датчик автономного неразрушающего контроля нагруженности и истощения несущей способности деталей и конструкций // Пробл. прочности. – 1990. – С. 110–114.
4. Разрушение твердых тел / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1967. – 500 с.
5. Гурьев А.В., Савкин А.Н. Роль микропластических деформаций в развитии усталостных повреждений в металлах // Механическая усталость металлов. – К.: Наук. думка, 1983. – С. 122–129.
6. Cordero L., Ahmadieh A., Mazumdar P.K. A cumulative fatigue damage formulation for persistent slip band type materials // Scripta Metallurgica. – 1988. – Vol. 22. – P. 1761–1764.
7. Терезулов И.Г. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – М.: Высш. шк., 1984. – 472 с.
8. Прочность при малоцикловом нагружении / С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, В.П. Когаев и др. – М.: Наука, 1975. – 378 с.

Стаття надійшла до редакції 01.12.03.